

Corrigés des exercices

Mémoriser son cours

1. Un modèle climatique numérique est un modèle numérique simulant des paramètres climatiques. Il est composé d'une combinaison de modèles de l'atmosphère, des océans, des surfaces continentales et des glaces de mer.
2. Les mailles permettent une modélisation plus fine de l'atmosphère puisque les variables de sortie (vent, température, humidité...) sont calculées à l'intérieur de chaque maille. La taille des mailles est limitée par la puissance de calcul disponible. Les phénomènes physiques complexes dont l'échelle est inférieure à la taille de la maille (comme la formation des nuages) sont traités de manière statistique. Ces simplifications incontournables sont source de variabilité entre les modèles.
3. Pour tester la validité d'un modèle, les chercheurs confrontent ses variables de sortie à des observations météorologiques actuelles, comme par exemple des données satellites. Des simulations de climats passés sont également comparées à des archives paléoclimatiques.
4. Depuis 150 ans, début de la période industrielle, les gaz à effet de serre, majoritairement le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), sont rejetés en masse par les activités humaines. La source principale d'émission du CO_2 est le fonctionnement des centrales énergétiques. Les sources principales d'émissions de N_2O et CH_4 sont les activités agricoles (élevage, exploitation des terres après combustion de la biomasse par exemple).

5. La communauté des climatologues conclut à la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique actuel. Il n'y a donc pas de controverse scientifique. La controverse sur le réchauffement climatique est une controverse publique, car le réchauffement climatique affecte toutes nos sociétés. C'est une discussion par le public de résultats scientifiques. Les faits scientifiques se mêlent à des valeurs, des contraintes économiques, sociologiques, politiques et culturelles, ce qui les rend difficiles à distinguer.
6. Les modèles prédisent deux conséquences majeures du réchauffement climatique actuel sur les océans :
- La montée du niveau océanique, principalement due à la fonte des glaciers continentaux et à la dilatation thermique (voir [chapitre 2](#))
 - L'acidification des océans. Le CO₂ se dissout d'autant plus facilement dans l'eau que celle-ci est chaude. L'augmentation de température des océans s'accompagne d'une plus grande dissolution du CO₂ qui entraîne une diminution de pH. Cette acidification a de grandes conséquences sur les organismes marins, comme par exemple les coraux.

Pour s'échauffer

1. QCM

1.

- a. Faux, bien que certaines lois de la physique soient utilisées à la fois dans les modèles météorologiques et climatiques, ces modèles sont très différents.
- b. Vrai.
- c. Vrai.
- d. Faux, la résolution spatiale est généralement de l'ordre de la centaine de km.

2.

- a. Vrai.
- b. Faux, les modélisations climatiques sont limitées par la puissance de calcul des ordinateurs.
- c. Faux.
- d. Vrai.

3.

- a. Faux, l'océan est un réservoir important de CO₂ dissous.
- b. Faux, le CO₂ n'est pas sous forme de bulles de gaz, il est dissous dans l'eau de mer.
- c. Vrai, pour rappel, une diminution de pH correspond à une augmentation d'acidité.
- d. Faux.

4.

- a. Faux.

b. Faux.

c. Vrai, les méridiens divisent la Terre en 360° (longitude) et les parallèles divisent chaque moitié de Terre en 180° (latitude).

d. Faux.

5.

a. Faux, la fabrication de ciments produit du CO_2 .

b. Faux, les véhicules comme les voitures thermiques émettent surtout CO_2 et N_2O .

c. Vrai, il y a aussi les activités agricoles qui rejettent du méthane.

d. Faux, ils émettent surtout CO_2 et N_2O .

6.

a. Faux.

b. Vrai, leur traitement est statistique, ce qui conduit à des approximations.

c. Vrai.

d. Vrai, ces approximations sont une des sources de variabilité entre les modèles.

7.

a. Faux, pas uniquement.

b. Faux, ce serait contraire à la démarche scientifique !

c. Vrai, on confronte les résultats du modèle à des données issues de climats du passé.

d. Vrai, on confronte les résultats du modèle à des mesures climatiques actuelles.

8.

a. Faux.

b. Faux, quand la concentration de H^+ augmente, le pH diminue.

c. Vrai.

d. Faux, c'est la cause de la diminution du pH.

9.

a. Faux.

b. Vrai, la production agricole émet principalement N_2O et CH_4 .

c. Faux.

d. Faux.

10.

a. Vrai.

- b. Faux, on observe une élévation du niveau océanique suite au réchauffement climatique.
- c. Faux, car le CO₂ est un réactif de la photosynthèse. Une augmentation de CO₂ tend donc à favoriser la photosynthèse.
- d. Faux, les modèles s'accordent à prédire une augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes, comme les cyclones.

2. Vrai/Faux

- 1. Vrai
- 2. Faux, les résultats des modèles sont aussi comparés à des indicateurs de climats du passé.
- 3. Faux, c'est la résolution spatiale d'un modèle qui est définie par la largeur des mailles.
- 4. Faux, la production de ciment par exemple (exploitation de ressources carbonatées) est aussi émettrice de CO₂.
- 5. Faux, elle a augmenté d'environ 1 °C.
- 6. Vrai, Bien qu'émis en très petite quantité, ils ont une longue espérance de vie dans l'atmosphère.
- 7. Vrai, cette augmentation est liée à la fonte des glaces continentales et à la dilatation thermique des océans.
- 8. Faux, c'est la diminution de pH qui induit la dissolution du calcaire dans l'eau.

3. Questions à réponses courtes

- 1. Les GES induisent un forçage radiatif positif
- 2. Il repose sur des équations mathématiques établies grâce aux lois de la physique et chimie atmosphériques.
- 3. C'est la période de temps qui sépare deux calculs du modèle. Son ordre de grandeur est la minute.
- 4. C'est la taille des mailles du modèle. Elle est généralement de l'ordre de 100 km dans les modèles actuels.
- 5. La montée du niveau des océans et l'acidification des océans.
- 6. C'est le GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

4. Retrouvez la question

- 1. Comment les scientifiques évaluent-ils la fiabilité d'un modèle climatique ?
- 2. Sur quoi repose le cœur d'un modèle global du climat ?
- 3. Quelles sont les conséquences des prédictions des modèles sur le régime des pluies et sur les océans pour la fin du siècle ?
- 4. Depuis combien de temps observe-t-on le réchauffement climatique vécu actuellement ?
- 5. Quels sont les trois principaux gaz à effet de serre ?
- 6. Par quoi sont limitées la résolution spatiale et la résolution temporelle d'un modèle numérique du climat ?

5. Les variables de Simclimat

- 1. D'un côté, une augmentation de température entraîne davantage d'évaporation et donc augmente la concentration en H₂O atmosphérique. De l'autre côté, H₂O étant un gaz à effet de serre, sa concentration atmosphérique a un impact sur la température terrestre.
- 2. Une augmentation de la latitude des calottes signifie que les calottes rétrécissent puisqu'on ne les trouve plus dans les latitudes basses. Ce phénomène s'accompagne alors d'une diminution de

l'albédo, ce qui entraîne une augmentation de la température terrestre (boucle de rétroaction positive de l'albédo vue dans le [chapitre 2](#)).

3. Tous les paramètres en bleu sur le schéma sauf « Émission GES humaine » sont impliqués dans le forçage radiatif naturel.
4. La végétation et les océans ont un rôle de puits de CO₂, c'est-à-dire qu'ils contribuent à diminuer la concentration en CO₂ atmosphérique.

6. Maillage d'un modèle climatique

1. $60 \times 62 \times 32 = 119\,040$ mailles à la surface de la Terre.
2. On a 62 mailles en longitude donc chaque maille mesure $\frac{360}{62} = 5,8^\circ$ de longitude.

Au niveau de l'équateur, le périmètre de la Terre est $2\pi R_T$ (avec R_T le rayon de la Terre, soit environ 40 000km, voir [aide p.62](#)). La taille d'une maille en longitude à l'équateur vaut donc $\frac{40\,000}{62} = 645$ km.

On a 60 mailles en latitude donc chaque maille mesure $\frac{180}{60} = 3,0^\circ$ de latitude.

Chaque moitié de méridien (20 000 km) est donc divisé en 60 mailles, ce qui donne $\frac{20\,000}{60} = 333$ km de longueur en latitude.

7. Une simulation numérique

1. On observe une augmentation de température globale en Afrique. La température moyenne en Afrique du Nord et Afrique Saharienne sera supérieure à 30 °C en 2100. La zone de températures supérieures à 30 °C couvre toute la moitié Nord de l'Afrique en 2100 et s'étend donc davantage par rapport à 2015. Dans la moitié Sud de l'Afrique, les isothermes de 10 et 20 °C sont repoussées vers le Sud de l'Afrique entre 2015 et 2100.
2. Avec l'augmentation de température, on peut imaginer encore plus de sécheresse dans des régions déjà arides proches du Sahara (donc une modification du régime des pluies). On peut imaginer plus d'incendies également, corrélés souvent aux vagues de chaleur et de sécheresse. On peut enfin imaginer davantage d'événements météorologiques extrêmes (tornades, orages violents etc.).

8. Corrélation et causalité

1. En l'absence de données supplémentaire, ces deux graphiques représentent une corrélation entre l'anomalie de température moyenne et le PIB mondial.
2. Une théorie scientifique permet de passer d'une corrélation à une causalité. Pour expliquer la corrélation observée, on peut avancer l'hypothèse suivante : une augmentation de PIB mondiale montre un développement économique dans de nombreux pays, ce qui est synonyme de davantage d'émissions de GES par les activités humaines (constructions en béton, davantage de transports, besoins énergétiques accrus...). Les GES étant responsables d'un forçage radiatif positif, une augmentation de GES associée à une augmentation du PIB mondial peut expliquer l'augmentation de température observée.

Méthode : Exercices d'application

10. Des modèles pour anticiper les effets sur les agrosystèmes continentaux

Les risques seraient élevés pour l'agriculture à cause de la pénurie d'eau, de la perte de végétation et les dommages liés aux incendies. L'érosion des sols n'est que modérément impactée. En ce qui concerne la santé humaine, les principales conséquences sont liées à la pénurie alimentaire et hydrique ainsi qu'aux risques liés aux incendies.

11. Impact du réchauffement climatique sur des organismes marins

Un réchauffement global de 3 °C n'a aucun effet notable sur les écosystèmes abyssaux (*remarque* : ceci est en parti lié à la lenteur de la circulation des eaux profondes qui ne permet pas d'observer d'effets notables aux échelles de temps considérées dans ces modèles). En ce qui concerne les écosystèmes photosynthétiques, les espèces (algues flottantes, herbiers, plancton) ont un risque de souffrir fortement, ce qui peut entraîner une diminution de la photosynthèse. Il en résultera alors une diminution du piégeage du CO₂ et donc une amplification de l'effet de serre.

Tester ses compétences

12. Puissance de calculs

5,119 pétaFLOPS = $5,119 \times 10^{15}$ FLOPS = $5,119 \times 10^6$ gigaFLOPS

Entre 1992 et 2016 (soit 24 ans) la vitesse est passée de 2 gigaFLOPS à 5,119 pétaFLOPS soit un facteur 2 600 000 environ pour cette période. Cela signifie que la vitesse des ordinateurs utilisés dans les centres de simulation numérique du climat a augmenté d'un facteur 110 000 par an !

Comme les méridiens divisent la Terre en 360°, à l'équateur, une maille de 7,5° de longitude a pour longueur : $\frac{40\,000 \times 7,5}{360} = 833$ km (cette longueur diminue lorsqu'on s'éloigne de l'équateur et que la latitude augmente).

On a de plus $\frac{360}{7,5} = 48$ mailles pour une latitude donnée.

Comme les parallèles divisent chaque moitié de Terre (soit 20 000 km) en 180°, une maille de 4,5° de latitude a pour longueur $\frac{20\,000 \times 4,5}{180} = 500$ km.

On a de plus $\frac{180}{4,5} = 40$ maille pour une longitude donnée.

On obtient ainsi un total de $48 \times 40 = 1\,920$ mailles au sol.

4. $1\,920$ mailles \times 18 couches \times 20 variables \times 480 ans \times 365,5 jours \times 24 h \times 3 blocs de 20 min = $8,731 \times 10^{12}$ opérations.

Pour 24h de calcul cela revient à : $1,01 \times 10^8$ opérations/seconde.

Remarque : On peut noter que ces calculs sont uniquement pour un modèle atmosphérique. Il n'y a pas le système océan, ni les interactions avec le continent, et le nombre de variables n'est pas exact.

5. Pour une minute de calcul, on a $\frac{8,731 \times 10^{12}}{60} = 1,46 \times 10^{11}$ opérations/seconde.